

재광화 완충용액의 pH 변화가 상아질의 재광화에 미치는 영향

김성철 · 노병덕 · 정일영 · 이찬영*

연세대학교 대학원 치의학과 치과보존학교실

ABSTRACT

THE EFFECT OF THE pH OF REMINERALIZED BUFFER SOLUTIONS
ON DENTIN REMINERALIZATION

Sung-Chul Kim, Bung-Duk Roh, Il-Young Jung, Chan-Young Lee

Department of Conservative Dentistry, College of Dentistry, Yonsei University

Dental caries is the most common disease in the oral cavity. However, the mechanism and treatment of dental caries is not completely understood since many complex factors are involved. Especially the effect of pH on remineralization of early stage of dental caries is still controversial.

In this study, dental caries in dentin was induced by using lactic acidulated buffering solutions and the loss of inorganic substance was measured. Also decalcified specimens were remineralized by three groups of solution with different pH (group of pH 4.3, 5.0, and 5.5). Then, the amount and the area of inorganic substance precipitation was quantitatively analyzed with microradiograph. Also a qualitative comparison of the normal phase, the demineralized phase, and the remineralized phase of hydroxyapatite crystal was made under SEM.

The results were as follows:

1. In microradiographic analysis, as the pH increased, the amount of remineralization in decalcified dentin tended to increase significantly. As the pH decreased, deeper decalcification, however, occurred along with remineralization. The group of pH 5.5 had a tendency to be remineralized without demineralization ($p < 0.05$).
2. In SEM view, the remineralization in dentine caries occurred from the hydroxyapatite crystal surface surrounding the mesh of organic matrix, and eventually filled up the demineralized area.
3. 5 days after remineralization, hydroxyapatite crystal grew bigger with deposition of inorganic substance in pH 4.3 and 5.0 group, and the crystal in the remineralized area appeared to return to normal. After 10 days, the crystals in group of pH 4.3 and 5.0, which grew bigger after 5 days of remineralization, turned back to their normal size, but in group of pH 5.5, some crystals were found to double their size.

In according to the results of this experiment, the decalcifying and remineralizing process of dentine is neither simple nor independent, but a dynamic process in which decalcification and remineralization occur simultaneously. The remineralization process occurred from the hydroxyapatite crystal surface. [J Kor Acad Cons Dent 32(2):151-161, 2007]

* Corresponding Author: **Chan-Young Lee**

Department of Conservative Dentistry,
College of Dentistry, Yonsei University
134, Shinchon-dong, Seodaemun-gu, Seoul, 120-752, Korea
Tel: 82-2-2228-8700
E-mail: chanyoungl@yumc.yonsei.ac.kr

Key words: Remineralization, Dentin, pH, Demineralization, Enamel, Scanning electron microscope

- Received 2007.1.25., revised 2007.2.15.,
accepted 2007.2.22. -

I. 서 론

일반적으로 치아우식증이라고 하면 대개 청소년기에 호발하는 것으로 알려져 왔지만 인간의 수명이 길어지면서 치조골 손실과 치은퇴축으로 인해 치근이 노출되고 치근우식이 발생하는 빈도가 증가되고 있다 (Shay, 1997). Katz는 치근퇴축을 보이는 치근의 15%에서 치근우식으로 진행되었고, 성인의 20 - 40%에서 치근우식이 발견되었다고 보고하였다 (1985).

법랑질과 상아질은 조직학적, 화학적으로 많은 차이를 나타내는데 법랑질은 무게의 95 - 98%가 무기질이고 1 - 2%의 유기질로 이루어진 반면 상아질은 무기질이 70%이고 유기질과 수분이 30%를 차지하고 있다 (Sturdevant, 1995). 즉 상아질은 생물학적으로 살아있는 조직이나 법랑질은 생물학적으로 활동적인 물질이 아니다.

이러한 상아질의 재광화는 치근 우식 예방과 과민치아 치료를 위해 중요한데, 법랑질의 재광화와 비교해서 상아질은 무기질뿐만 아니라 교원 단백질과 비교원 단백질을 함유하고 있기 때문에 매우 복잡한 과정을 겪게 된다.

재광화에 있어서 pH의 효과에 대해서는 아직 논란의 여지가 있다. Feagin 등(1971)은 재광화와 완충용액의 pH 증가 사이에는 비례적 상관관계가 존재한다고 하였고, Featherstone 등(1981)에 의하면 재광화에 적당한 pH는 무기질의 침착이 가능하며 법랑질의 용해가 일어나지 않는 pH 6 - 8이라고 보고한 반면, Margolis 등 (1986)은 1ppm의 불소 첨가시 중성용액보다는 오히려 탈회용액일 때 총 광물질의 손실은 관찰되지 않았고 법랑질의 불소 함유량이 증가했음을 보고하였다.

Nancollis와 Durdie 등 (1964)은 solid-solution interface의 반응성은 용액의 pH 변화에 영향을 받으며 불소이온의 첨가는 탈회와 재광화의 평형에 도달하기 위한 칼슘, 인, 수소이온의 농도를 낮춘다고 하였다. Lammer 등 (1990)에 의하면 pH는 낮은 농도의 불소이온 농도에서만 재광화 효과가 크며 높은 농도의 불소이온에서 완충용액의 pH 효과는 차이가 없다고 하였고, Theuns 등 (1984)은 pH는 표층의 우식형성에는 영향이 없고 탈회의 진행속도에 영향을 미쳐 pH가 낮을수록 탈회가 더 빠르게 진행된다고 하였으나 병소자체에는 미세한 효과를 미친다고 하였다. 김 등 (1997)에 의하면 법랑질에서는 pH가 증가함에 따라 재광화 되는 정도를 편광현미경으로 관찰하였는데 pH가 4.5인 경우보다 5.5인 경우에 더 많은 재광화를 관찰할 수 있었으나 부위별 정도에 대해서는 알 수가 없었다.

이상과 같이 상아질 인공우식의 형성과 재광화에 관한 많은 연구가 진행되었으나 pH가 상아질의 재광화에 있어서 표면뿐만 아니라 심부로의 재광화에 미치는 영향에 대해서는 아직 정확한 이론이 정립되어 있지 않은 상태이다.

이번 실험의 목적은 정량적인 측정 방법인 Micro-radiograph와 정성적인 측정 방법인 주사전자 현미경을 이용하여, 상아질의 재광화에 효과적인 조건을 찾기 위해 불소가 포함된 재광화 용액의 pH를 변화시켜 재광화에 미치는 효과와 수산화인회석 결정 형성 및 배열의 변화를 관찰하고자 한다.

II. 실험재료 및 방법

1. 시편제작

시편제작은 교정치료를 위해 발치한지 30일 이내의 충치 및 수복물이 없는 건전한 소구치를 선택하여 치근에 부착된 치주조직과 백악질을 periodontal curette으로 제거하고 불소가 포함되지 않은 pumice로 치근면을 연마한 다음 초음파 세척기로 10분간 처리하고 증류수로 세척, 건조하였다.

Microradiograph 관찰을 위해 건조된 치아는 아크릴 레진을 이용하여 치관부위를 매몰하고 경화 후 low speed diamond wheel saw (Minitom, Struers, Denmark)를 사용하여 근첨에서 5 mm 떨어진 위치에서 치아장축에 수직으로 300 - 400 μ m 절편을 만든 다음 #800 사포를 이용하여 200 μ m 두께로 연마하였다.

연마된 시편을 광학현미경으로 40배율로 관찰하며 협측면은 3 mm의 window를 제외하고 내산성의 nail varnish를 도포하고, 시편의 양측은 bonding agent (Scotchbond™ Multi-purpose, 3M, U.S.A.)를 도포하였다. 주사전자현미경을 관찰하기 위한 시편제작을 위해, Microradiograph 용 시편을 제작하고 남은 치근을 이용하였다. 손상이나 균열이 없는 부위에 가로 3 mm, 세로 3 mm의 window를 제외하고 nail varnish를 도포하였다.

2. Stock 용액의 제조

30% 유산용액 (Sigma Co., 분자량 90.09, 밀도 1.080)을 이용하여 1 M의 용액을 제조하였다. 염화칼슘 분말 (Sigma Co., 분자량 147.0)로 0.3 M의 용액을 제조하였고, 인산칼륨 분말 (Sigma Co., 분자량 136.1)로 부터 0.9 M의 인산칼륨 용액을 제조하였으며, 불화 나트륨분말 (Sigma Co., 분자량 41.99)로 100 ppm(5.2632 M)의 용액을 제조하였다.

3. 탈회 완충용액의 제조

Stock용액을 이용하여 유산용액 0.1 M, 칼슘 15.8 mM, 인 8.2 mM, NaN3 3.08 mM을 함유한 탈회 용액을 제조

한 후, 8 N KOH 표준용액을 이용하여 pH meter (Model 920A, Orion Research Inc., U.S.A.)를 이용하여 pH 4.3이 되도록 조절하였다. 위의 용액을 자동분석기 (Hitachi 736-40, Hitachi, Japan)로 분석하여 시편의 탈회용액으로 사용하였다 (Table 1).

4. 재광화 완충용액의 제조

농도 100 ppm의 불화나트륨 표준용액 (100 ppm NaF standard solution, Orion Research Inc., U.S.A.)을 이용하여 포화도는 0.21, 불소농도가 2 ppm인 3가지 다른 pH를 가지는 용액을 제조하기 위하여 stock용액을 이용하여 아래 Table 2의 조건으로 제조하여 자동분석기로 정량 분석한 다음 재광화 용액으로 이용하였다.

5. 인공 치아우식의 형성

2명의 환자에게서 교정치료를 위해 발치한 8개의 소구치를 이용하여 시편을 제작하고, 이 시편을 탈회용액에 처리하기 전, density를 정량화하기 위해 stepwedge를 이용하여 Microradiograph를 촬영하고, 50 cc 플라스틱 통에 Table 1 완충액을 채우고 시편을 통의 중앙에 위치하도록 설치한 후 25℃ 항온조에 유지시켰다. 1일 경과 후 편광현미경 (OPM-1, 동원, 대한민국)으로 표면으로부터 50 μ m 이상 탈회가 일어난 것을 확인하고 Microradiograph로 촬영하였다.

6. 인공 치아우식의 재광화

탈회시킨 시편을 각 군당 8개씩 3군으로 나누어 Table 2의 완충액을 채운 50cc 플라스틱통의 중앙에 위치시키고 25℃ 항온조에 보관 하면서 5일 경과 후 Microradiograph로 촬영하였다.

7. Microradiograph 촬영

Microradiograph 촬영은 탈회 전, 후 그리고 재광화 5일 후 촬영하였다. 이때 density를 정량화하기 위해 aluminium foil을 겹쳐서 15 단계로 만든 stepwedge를 사용하였고, 촬영은 동일한 조건을 위해 5 mA, 37 Kvp하에서 1시간 30분 촬영 하였으며, Microradiograph film의 현상과 정착은 각각 3분 동안 시행하였다.

이 film를 광학현미경 (BX50, Olympus, Japan)으로 100배로 확대하여 촬영하고 Image Analyzer (Image pro plus, Media-cyber-netics, U.S.A.)로 density를 표준화하여 분석하고 탈회 전, 후 재광화 후의 결과를 Excel (MS Office 2000, Microsoft, U.S.A.)에서 그래프를 얻고, 그 그래프 상의 면적은 Scion image analyzer (Scion Corporation, Maryland, U.S.A.)로 산출하여 탈회가 일어난 양과 재광화가 일어난 양을 백분율로 환산하였다.

이 결과를 각 군 간의 비교로 one-way ANOVA를 수행하였고 다중비교는 Tukey' test를 이용하여 통계 처리 하였다.

8. 주사전자현미경 관찰

주사전자현미경 관찰을 위해 준비한 치아를, 50cc 플라스틱 통에 완충용액을 채우고 중앙에 위치하도록 설치한 후 25℃ 항온조에 유지시킨다. 탈회 1일경과 후, 재광화 5일 경과 후 그리고 재광화 10일 경과 후 시편을 완충액에서 꺼내 증류수에 세척한 후 치아 장축에 수직으로 osteotome과 mallet을 이용하여 치근을 파절시켰다. 이때 파절된 시편을 증류수에 24시간 담근 후 건조시켜 보관하였다. 이렇게 준비된 정상상아질 시편 2개, 탈회시편 2개, 군당 3개씩 9개의 재광화 시편을 aluminium stubs에 고정시킨 후 진공상태에서 도금처리 하여 주사전자현미경 (Hitachi, S-800, Japan)으로 관찰하였다.

Table 1. Initial composition of demineralization solution

Composition	Concentration
Lactic acid (M)	0.1
Ca ²⁺ (mM)	15.9
PO ₄ ³⁻ (mM)	8.1
Sodium azide (mM)	3.08
pH	4.3

Table 2 Initial composition of remineralization solution

Group Composition	I	II	III
Lactic acid (M)	0.1	0.1	0.1
Ca ²⁺ (mM)	27.24	7.01	2.52
PO ₄ ³⁻ (mM)	9.92	2.44	1.01
F ⁻ (mM)	2.0	2.0	2.0
pH	4.3	5.0	5.5

Ⅲ. 실험 성적

1. Microradiograph 분석

Microradiograph상에서 세 군간의 탈회와 재광화 후 광물질 변화의 정량적 분석 결과는 Table 3, Figures 1 - 3 과 같은 결과를 얻었다.

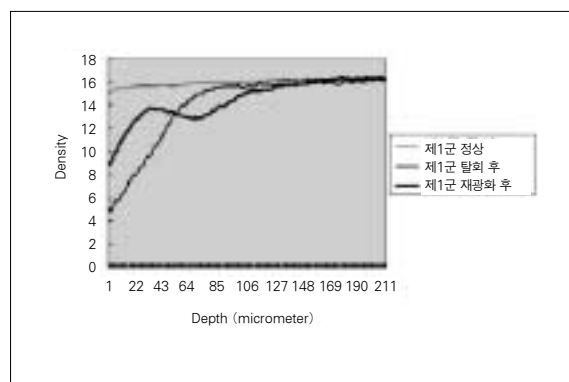


Figure 1. Quantitative mineral density change of dentin during de- & remineralization of pH 4.3 group.

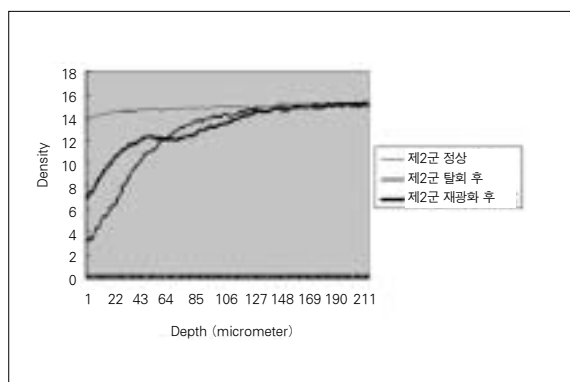


Figure 2. Quantitative mineral density change of dentin during de- & remineralization of pH 5.0 group.

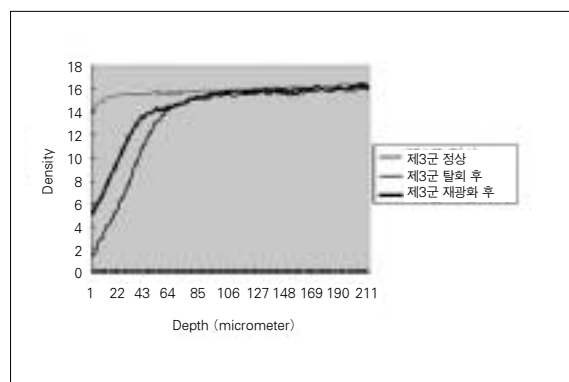


Figure 3. Quantitative mineral density change of dentin during de- & remineralization of pH 5.5 group.

Table 3. Quantitative mineral change (%) of dentin during de- & remineralization

Group	Area %	Demi. loss area Mean \pm S.D.	Remi. Gain area Mean \pm S.D.	Remi. loss area Mean \pm S.D.	Remi. Δ area Mean \pm S.D.
I (pH 4.3)		23.89 (\pm 9.28)	9.91 (\pm 6.39)	4.49 (\pm 2.67)	5.51 (\pm 5.28)
II (pH 5.0)		25.78 (\pm 4.63)	8.36 (\pm 2.87)	2.12 (\pm 1.52)	6.51 (\pm 2.72)
III (pH 5.5)		24.4 (\pm 6.12)	10.65 (\pm 5.70)	0.29 (\pm 0.45)	10.39 (\pm 2.83)

*: $p < 0.05$

2. 주사전자현미경 관찰

1) 정상 상아질

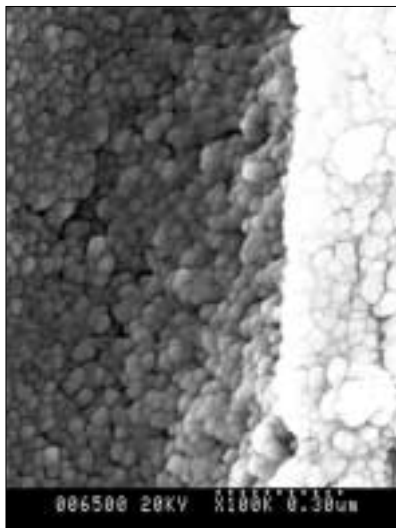


Figure 4. SEM micrograph of normal dentin ($\times 100,000$).

2) 탈회된 상아질

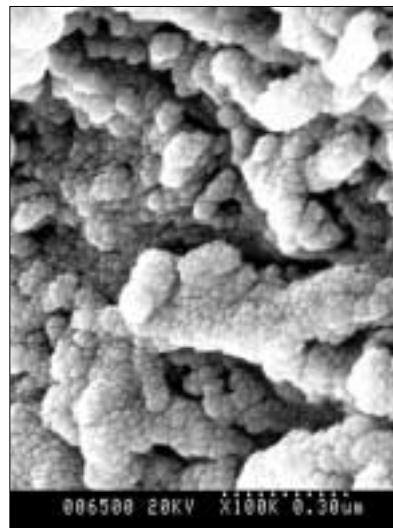


Figure 5. SEM micrograph of the demineralized dentin ($\times 100,000$).

Microradiograph상에서 세 군간의 탈회와 재광화 후 광물질 변화의 정량적 분석 결과에 따라 변화가 많이 관찰된 곳을 주사전자현미경으로 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

3) 재광화 5일 후 소견 가) pH 4.3 군

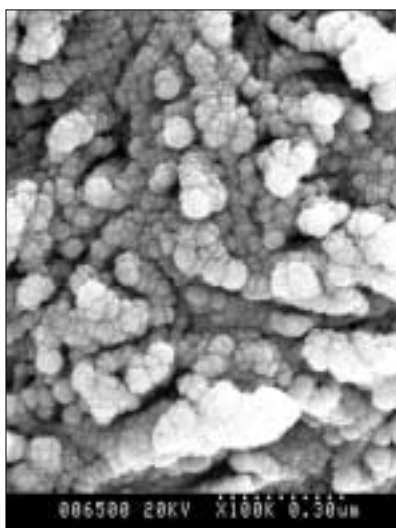


Figure 6. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 4.3 group at $30\ \mu\text{m}$ area from the surface layer ($\times 100,000$).

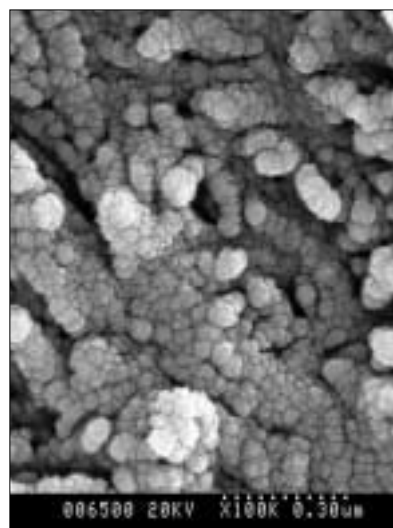


Figure 7. SEM micrograph of the demineralized dentin of pH 4.3 group at $70\ \mu\text{m}$ area from the surface layer ($\times 100,000$).

나) pH 5.0 군

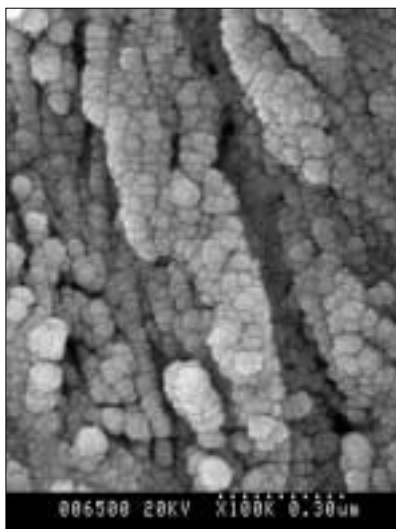


Figure 8. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 5.0 group at 50 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

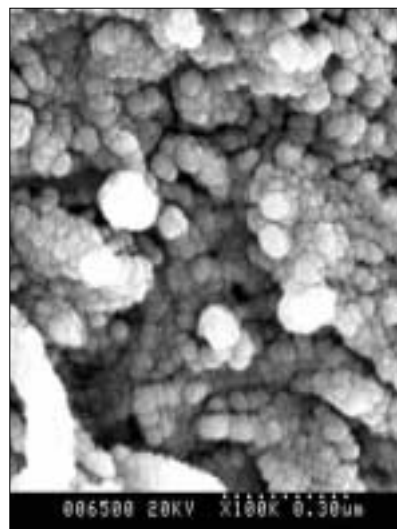


Figure 9. SEM micrograph of the demineralized dentin of pH 5.0 group at 70 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

다) pH 5.5 군

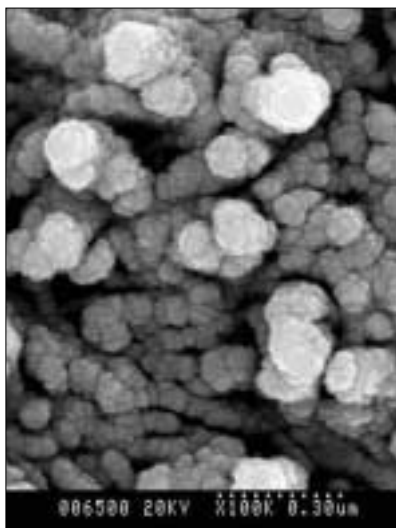


Figure 10. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 5.5 group at 40 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

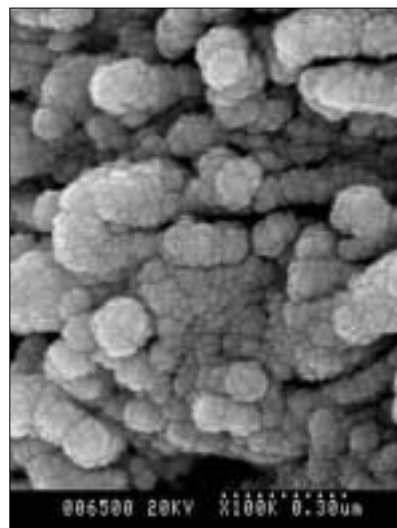


Figure 11. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 5.5 group at 70 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

4) 재광화 10일 후 소견

가) pH 4.3 군

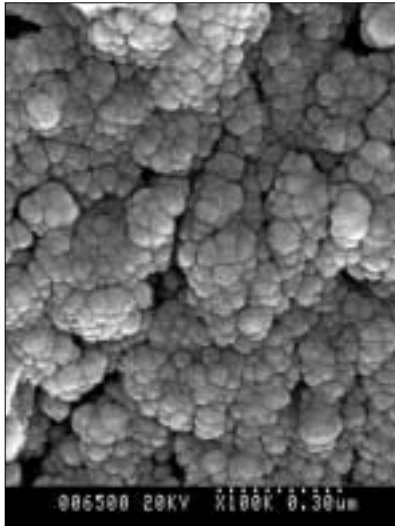


Figure 12. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 4.3 group at 30 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

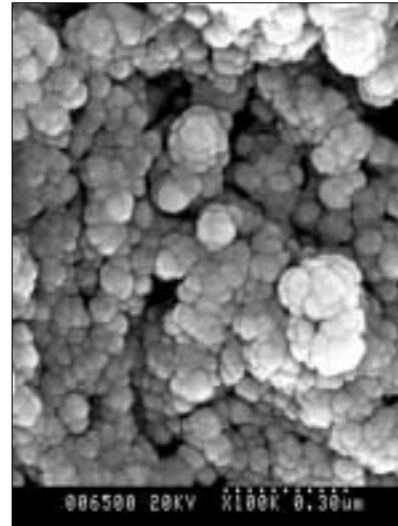


Figure 13. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 4.3 group at 70 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

나) pH 5.0 군

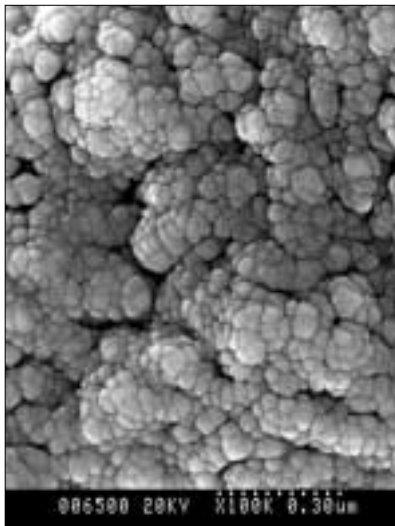


Figure 14. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 5.0 group at 50 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

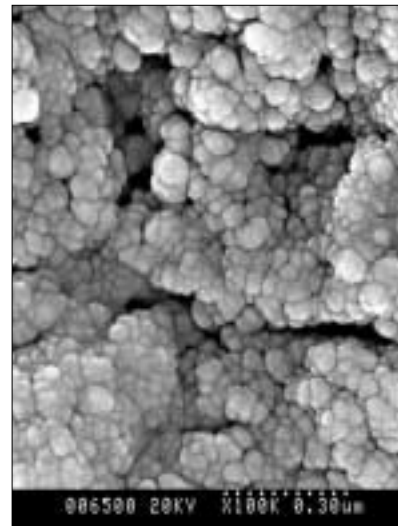


Figure 15. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 5.0 group at 70 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

다) pH 5.5 군

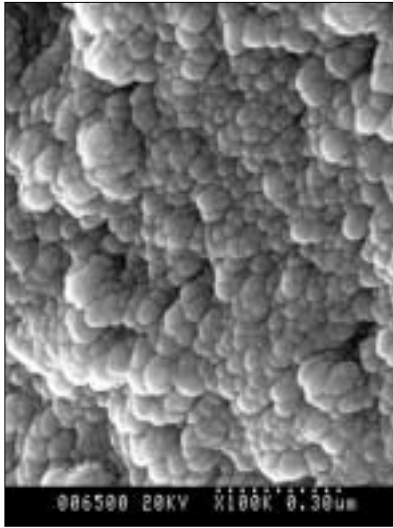


Figure 16. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 5.5 group at 40 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

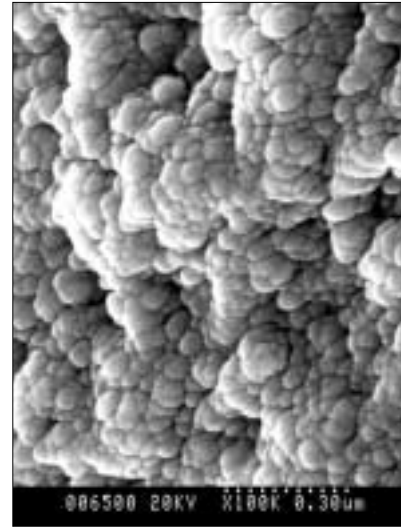


Figure 17. SEM micrograph of the remineralized dentin of pH 5.5 group at 70 μm area from the surface layer ($\times 100,000$).

IV. 총괄 및 고찰

치아우식에는 여러 가지 요소가 영향을 미칠 수 있는데, 유기산의 종류와 농도, 치아의 무기물과 유기물의 화학적 조성, 불소의 농도, pH 그리고 타액의 조성 등의 매우 복잡적이고 다양한 인자들에 의해 결정되는 현상이라고 볼 수 있다.

본 실험에서는 이전에 상아질 우식에 대한 여러 가지 조건을 변화시켜 시행했던 실험의 일환으로 유산 완충용액을 이용해서 상아질에 인공우식을 형성한 후 pH를 달리한 재광화 용액을 이용하여 재광화 시키고, 그 양상을 Microradiograph를 이용하여 정량적으로 비교분석하고, 또한 주사전자현미경으로 관찰하여 재광화에 최적의 조건을 찾고자 하였다.

본 실험에서는 주사전자현미경 관찰을 통해 관간상아질의 재광화 시, 탈회 되었을 때 형성된 세공을 채우는 형태로 재광화가 진행되었는데, 이때 기존의 수산화인회석을 중심으로 재광화가 일어나며 이로 인해 세공들이 채워지는 양상을 보였다. 관주상아질의 재광화는 탈회되어 유기 기질 망만 남은 경우에도 이 유기기질 망을 중심으로 재광화가 진행되어 구조물사이의 공간이 채워져서 상아세관의 형태를 회복하는 것을 확인 할 수 있었다.

본 실험에서는 불소의 농도를 2 ppm으로 설정하였고, 그 결과 임계 pH이하에서도 상아질의 재광화가 일어났는데 이는 불소의 지속적인 공급에 의한 효과인 것으로 사료된다.

한편 한 등 (2003)에서 관찰된, 고농도의 불소에 의해 불화인회석이 많이 침착된 hypermineralization된 부위는 Microradiograph상에서는 어느 군에서도 관찰할 수 없었으나 주사전자현미경 상에서는 재광화 5일 후 pH 5.5 군에서 상아세관 주위가 원래의 형태보다 재광화가 다소 많이 일어난 것을 관찰 할 수 있었다. 또한 재광화 10일 후 pH 5.0 군과 pH 5.5 군에서 표면으로부터 40 - 50 μm 부위 관주상아질에서 hypermineralization된 유기기질 망을 관찰할 수 있었으며, pH 5.5 군의 70 μm 부위 관주상아질에서는 유기기질 망 이상으로 재광화 되었고 관간상아질에서는 재광화 양이 매우 많아 용기된 듯한 거친 표면을 관찰할 수 있었다. 이는 한 등(2003)의 실험에 비해 불소의 농도가 낮았고 5일 재광화군에서는 양이 적었으나 매일 용액을 교체해주면서 10일간 충분히 재광화 시킨 경우에는 불화인회석의 침착에 의한 hypermineralization이 가능했던 것으로 생각된다.

본 실험에서도 Microradiograph 관찰 시 재광화 5일 후 pH 4.3, 5.0 군에서 재광화가 일어난 부위의 하방에서 탈회가 일어난 것을 확인할 수 있었는데 이는 transport barrier에 의해 재광화에 필요한 인자들은 내부로의 침투가 일어나지 않고 산에 의한 탈회가 일어났기 때문이라고 사료된다. 또한 pH 5.5 군에 있어서는 재광화 시 탈회부위 없이 재광화가 일어났다. 이상의 결과로 pH 5.5군에서 전체적으로 유의차 있게 재광화가 많이 일어난 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 표면층뿐만 아니라 내부로의 재광화가 일어난

결과로 사료된다. 탈회 깊이에 있어서는 $100 \pm 25 \mu\text{m}$ 로 각 군이 거의 일치하였지만 재광화 후에는 재탈회가 일어난 pH 4.3, pH 5.5 군은 $130 \pm 25 \mu\text{m}$ 로 깊어졌지만 pH 5.5 군에서는 거의 변화가 없었다.

재광화 5일과 10일 후 Microradiograph와 주사현미경상에서 pH 5.5 군에서 병소전체에 재광화가 깊은 부위까지 진행된 것을 관찰 할 수 있었는데 이는 깊은 병소부위의 재광화에 있어서 비교적 낮은 0.2의 포화도 용액을 사용한 본 실험에서, 이온의 이동 속도가 느리고 수산화인회석 결정의 형성이 느린, 낮은 포화도에서 병소전체에 재광화가 일어난다고 한 박 등 (1993)과 일치하는 결과를 확인할 수 있었다. 이러한 동력학적인 힘에 의해 탈회와 무기질의 침착이 반복되면서 상아질 우식 병소에서 재광화가 일어날 때, 포화도에 변화를 주게 되면 다소 다른 양상의 진행이 가능할 것으로 생각되며 더 많은 연구가 필요하리라 사료된다.

탈회에 대한 pH의 역할에 대해서는 일반적인 동의가 있으나 재광화에 있어서는 많은 논란의 여지가 있다. Gerdin (1974)과 Koch (1982)은 250 ppm의 불소를 포함하는 pH 5.5의 산성 치약이 1000 ppm의 불소를 포함하는 중성 치약에 비해 임상적으로 효과가 있음을 보고하였고, Margolis 등 (1986)은 1ppm의 불소가 포함된 탈회 용액과 중성용액에 노출된 법랑질을 조직검사 하여 탈회 용액으로 처리했을 때는 총 광물질의 손실이 관찰되지 않고 법랑질의 불소 함유량이 증가한데 반해 중성 용액으로 처리하였을 때에는 불소의 유입이 관찰되지 않았다. 이는 산성 용액이 중성 용액보다 효과가 있음을 의미하는 것이다. Nancollas 등 (1964)은 solid solution interface의 반응성은 용액의 pH 변화에 영향을 받으며 불소 이온의 첨가는 탈회-재광화 평형에 도달하기 위해 필요한 칼슘, 인, 수소이온의 농도를 낮춘다고 하였다. Theuns 등 (1984)은 pH는 표층의 무기물 성분에는 거의 영향이 없고 병소 자체의 무기질 성분에만 미세한 효과를 끼친다고 보고하였다.

본 실험에서 Microradiograph 분석시 pH 4.3 군에 비해 pH 5.5 군에서 유의차 있게 더 많은 재광화가 일어났으며 표면으로부터의 peak를 이루는 부위는 pH 4.3군이 $35.0 \mu\text{m}$ 로 pH 5.0 군의 $45.5 \mu\text{m}$ 보다 낮은 부위에서 재광화가 많이 일어났다. 이 부위보다 깊은 곳에서 일어난 재탈회된 부위는 탈회가 동시에 일어나는 재광화 과정에서 재광화에 필요한 구성요소인 칼슘, 인, 불소등이 소진되어 재광화를 보다 탈회율이 증가하였기 때문이라고 생각된다. 그러나 pH 5.5 군은 전반적으로 재광화가 일어나 다른 군에 비해 효과가 가장 좋은 것으로 나타났는데 이는 재광화율이 탈회를 보다 높기 때문이라고 사료된다. 이는 Arend 등 (1989), Feagin 등 (1971), Lammers 등 (1992), Ten Cate (1990), 김 등 (1997)의 연구와 일치하는 것으로,

pH가 낮아야 심부까지 재광화가 일어 난다고한 Margolis 등 (1986)와 박 (2000) 등의 연구와는 다소 상반된 결과를 보였다. 또한 표면으로부터의 peak를 이루는 부위가 pH 4.3에서 가장 낮게 나타난 것은 같은 포화도일지라도 pH 4.3 군에서 칼슘과 인의 농도가 상대적으로 가장 높았기 때문이라고 생각된다.

주사전자현미경으로 100,000배로 관찰시 정상상아질의 수산화인회석 결정의 크기는 10 - 30 nm였으며 이와 비교해서 탈회상아질에서 결정의 크기는 5 - 20 nm로 감소하였으며 재광화 5일 후에는 관상상아질의 수산화인회석 결정은 pH 4.3 군에서 최고 50 - 60 nm로 1.5 - 2 배정도 커졌으며 관주상아질의 결정은 정상상아질의 결정과 비슷한 20 - 30 nm 정도로 커진 것으로 관찰되었다. 또한 pH 4.3 군, 5.0 군에서 재탈회가 일어난 부위는 탈회용액에 의해 탈회가 일어난 부위와 유사한 결과를 보였다. 또한 재광화 10일 후 pH 4.3 군과 5.0 군에서 재광화 5일 후 peak를 이루었던 부위의 결정의 크기는 오히려 정상상아질의 수산화인회석 결정의 크기로 감소하였고 pH 5.5 군에서 50 - 60 nm까지 크기가 증가한 결정들을 관찰 할 수 있었다. 이는 재광화 과정이 단순한 재광화가 아니라 탈회와 재광화를 반복하면서 진행하게 되고 이 과정에서 pH 4.3 군과 5.0 군에서 탈회에 의해 정상상아질의 수산화인회석 결정의 크기로 줄어 들은 것으로 생각된다.

우식이 진행하게 되면 유기기질 주위 수산화인회석 결정만 남게 되고, 이 상태에 불소와 함께 칼슘과 인이 공급되면 기질 원섬유 주변의 수산화인회석이 연장되어 스핀들 형태의 결정체를 이루게 되는데 이러한 결정이 interfibrillar region을 채우는 양상으로 관찰되었다. 한 등 (2003)에 의하면 탈회 시 상아세판이 소실되고 유기 기질 망만으로 이루어진 구조를 전체적으로 관찰 할 수 있었는데 본 실험에서는 관주상아질에서만 유기 기질 망으로 이루어진 구조를 관찰할 수 있었으며 이는 탈회 기간이 1일로 짧았던 것이 이유라고 생각된다. 재광화 시에 결정들이 아주 조밀하게 침착되어 정상으로 회복되는 양상을 재광화 5일 후 pH 5.5 군의 $70 \mu\text{m}$ 부위에서만 관찰할 수 있었으나 재광화 10일 후에는 pH 4.3 군과 5.0 군의 30 - 50 μm 부위에서 관찰할 수 있었으며 pH 5.5 군에서는 hypermineralization되어 표면이 매우 거칠고 용기되는 양상을 관찰할 수 있었는데 이는 포화도가 0.21정도로 낮았으나 재광화 기간이 충분히 길고 재광화 용액이 매일 교체되어 공급되는 경우에는 한 등 (2003)과 같은 재광화 효과가 관찰될 수 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서 재광화 용액의 포화도와 불소의 양은 동일하게 하고 pH만을 변화시켜 상아질 표층뿐만 아니라 심부에서의 재광화 양상을 평가하기 위해 사용한 Microradiograph 분석법은 각 부위의 재광화의 양을 알 수 있었지

만, 그 침착기전에 대해서는 알 수 없었다. 또한 pH가 낮으면 심부방향으로 탈회뿐만 아니라 재광화도 진행할 수 있다는 이전 결과와는 다소 다른 결과를 나타내었다. 이는 상아질 심부로의 재광화에 있어서 pH뿐만 아니라 재광화 용액의 포화도와 불소 등 많은 변수들이 복합적으로 관여하기 때문으로 추측되며 향후 이에 대한 더 많은 연구가 필요하리라 사료된다. 또한 재광화에 필요한 무기질이 재광화 완충용액에서 얻어진 것인지 혹은 재광화시 탈회되는 부위에서 기원한 것인지에 대한 연구도 추가되어야 할 것으로 사료된다.

V. 결 론

본 연구는 유산 완충용액을 이용하여 상아질을 탈회시키고, 이 시편을 pH를 달리한 재광화용액에 노출시켰을 때 나타나는 무기질의 양적 변화와 무기질의 침착이 일어나는 부위를 Microradiograph를 이용하여 정량적으로 비교 분석하였다. 또한 주사전자현미경을 이용하여 상아질의 수산화인회석 결정의 정상 상태, 탈회 상태, 재광화가 일어났을 때의 상태를 정성적으로 비교 관찰하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Microradiograph 분석시 pH가 증가할수록 탈회된 상아질에서 재광화양이 유의차 있게 증가되는 경향을 보였고, pH가 낮아질수록 재광화가 일어나면서 더 깊게 탈회되는 양상을 보였으나, pH 5.5 군은 전반적으로 재광화가 일어나는 경향을 보였다 ($p < 0.05$).
2. 주사전자현미경 소견에서 상아질 우식의 재광화는, 유기질 망을 둘러싸고 있는 수산화인회석 결정의 표면으로부터 진행되며 결국에는 탈회 시 파괴된 공간을 채워가는 양상으로 관찰되었다.
3. 재광화 5일 후 pH 4.3, 5.0 군에서 무기질이 침착되어 수산화인회석결정이 정상보다 커졌으며, pH 5.5 군에서 재광화된 부위의 결정은 정상으로 회복되는 양상을 보였다. 재광화 10일 후 pH 4.3, 5.0 군에서 재광화 5일 후에 정상보다 커졌던 결정들이 정상상아질의 결정 크기로 줄어들었으며 pH 5.5 군에서는 결정의 크기가 2 배정도 커진 경우도 관찰되었다.

본 실험의 결과에 의하면 상아질의 우식과 재광화 과정은 단순한 탈회와 재광화의 독립적인 과정이 아니고 동력학적으로 탈회와 재광화가 동시에 일어나는 과정이며, 이때 재광화는 기존의 수산화인회석 결정의 표면으로부터 진행되었다.

참고문헌

1. Arends J, Jongebloed W, Ogaard B, Rolla G. SEM and microradiographic investigation of initial enamel caries. *Scand J Dent Res* 95(3):193-201, 1987.
2. Bowes DN, Dunn E.J. A simple vacuum cassette for microradiography. *Stain Technology* 50:355-357, 1975.

3. Chow LC, Takaki S. Remineralization of root lesions with concentrated Ca and P solutions. *J Dent Mater* 14(1):31-36, 1995.
4. Christensen GJ. A new challenge-root caries in mature people. *J Am Dent Assoc* 127:379-380, 1996.
5. Featherstone JDB. Comparison of artificial caries like lesions by quantitative microradiography and microhardness profile. *Caries Res* 17:385-391, 1983.
6. Holmen L, Thystrup A, Featherstone JDB, Fredebo L, Shariati M. A scanning electron microscopic study of surface changes during development of artificial caries. *Caries Res* 19:11-21, 1985.
7. Inaba D, Ruben J, Arends J. A computer-assisted videodensitometric method to visualize mineral distributions in *in vitro* and *in vivo* formed root caries lesion. *Eur J Oral Sci* 105:74-80, 1997.
8. Katz RV. Root caries: Clinical implication of the current epidemiologic data. *Northwest Dent* 60(6):306-310, 1981.
9. Kawasaki K, Ruben J, Takagi O. Relationship between mineral distributions in dentin lesions and subsequent remineralization *in vitro*. *Caries Res* 34:395-403, 2000.
10. Koch G, Petersson LG, Kling E. Effect of 250 and 1000ppm fluorid dentifrice on caries. A three-year clinical study. *Swed Dent J* 6(6):233-238, 1982.
11. Margolis HC, Moreno EC, Murphy BJ. Effect of low levels of fluoride in solution on enamel demineralization. *J Dent Res* 65:23-29, 1986.
12. Moreno EC, Margolis HC. Composition of human plaque fluid. *J Dent Res* 67(9):1181-1189, 2000.
13. Mukai Y, Ten cate JM. Remineralization of advanced root dentin lesions *in vitro*. *Caries Res* 36:275-280, 2002.
14. Rooij JF, Nancollas GH. The formation and remineralization of artificial white spot lesion. *J Dent Res* 63(6):864-867, 1984.
15. Silverstone LM, Hicks MJ, Featherstone MJ. Dynamic factors affecting lesion initiation and progression in human dental enamel. *Quin Int*, 19:773-785, 1988.
16. Ten Cate JM, Arends J Remineralization of artificial enamel lesions *in vitro*. *Caries Res* 11:277-284, 1977.
17. Theuns HM, van Dijk JWE, Driessens FCM, Groeneveld A. Effect of the pH of buffer solutions on artificial carious lesion formation in human tooth enamel. *Caries Res* 18:7-11, 1984.
19. Wefel JS, Heilman JR. Natural root caries : A histologic and microradiographic evaluation. *J Oral Path* 14:615-623, 1985.
20. White DJ, Chen WC, Nancollas GH. Kinetic and physical aspects of enamel remineralization. *Caries Res* 22:11-19, 1988.
21. 금기연, 이찬영. 수종의 유기산이 법랑질 인공 우식의 형성에 미치는 영향에 대한 연구. *대한치과보존학회지* 21:470-488, 1996.
22. 박성호, 이찬영. 유기산 완충용액을 이용한 인공치아우식의 형성에 미치는 산의 농도와 pH에 관한 연구. *대한치과보존학회지* 18:277-290, 1993.
23. 박정원, 이찬영. 유기산완충용액의 포화도가 법랑질과 상아질의 재광화에 미치는 영향과 수산화인회석의 AFM관찰. *대한치과보존학회지* 25:459-473, 2000.
24. 이찬영. 산 완충용액을 이용한 인공치아우식 형성. *연세치대논문집* 7:34-41, 1992.
25. 한원섭, 금기연, 이찬영. 인공치아우식의 재광화에 미치는 불소의 영향. *대한치과보존학회지* 21:161-173, 1996.

국문초록

재광화 완충용액의 pH 변화가 상아질의 재광화에 미치는 영향

김성철 · 노병덕 · 정일영 · 이찬영*

연세대학교 대학원 치의학과 치과보존학교실

치아 우식증은 구강 영역에서 가장 흔한 질환이나 여러 가지 복잡한 요소가 작용하기 때문에 이에 대한 발생기전과 치료법에 대해서는 완전히 이해되지 않은 상태이다. 특히 초기우식의 재광화에 있어서 pH의 영향에 대하여 논란의 여지가 있다.

본 연구에서는 유산 완충용액을 이용하여 상아질에 인공 우식을 형성하고 이때의 무기질 소실을 측정하고, 탈회된 시편을 pH가 다른 세가지 재광화 용액 (pH 4.3, 5.0, 5.5 군)으로 재광화시켰을 때 나타나는 무기질의 침착되는 양과 침착이 일어나는 부위를 Microradiograph를 이용하여 정량적으로 비교 분석하였다. 또한 주사전자현미경을 이용하여 수산화인회석 결정의 정상 상태, 탈회된 상태, 그리고 재광화가 일어났을 때의 상태를 정성적으로 비교하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

1. Microradiograph 분석시 pH가 증가할수록 탈회된 상아질에서 재광화양이 유의차 있게 증가되는 경향을 보였고, pH가 낮아질수록 재광화가 일어나면서 더 깊게 탈회되는 양상을 보였으나, pH 5.5 군은 전반적으로 재광화가 일어나는 경향을 보였다 ($p < 0.05$).
2. 주사전자현미경 소견에서 상아질 우식의 재광화는, 유기기질 망을 둘러싸고 있는 수산화인회석 결정의 표면으로부터 진행되며 결국에는 탈회 시 파괴된 공간을 채워가는 양상으로 관찰되었다.
3. 재광화 5일 후 pH 4.3, 5.0 군에서 무기질이 침착되어 수산화인회석결정이 정상보다 커졌으며, pH 5.5 군에서 재광화된 부위의 결정은 정상으로 회복되는 양상을 보였다. 재광화 10일 후 pH 4.3, 5.0 군에서 재광화 5일 후에 정상보다 커졌던 결정들이 정상상아질의 결정 크기로 줄어들었으며 pH 5.5 군에서는 결정의 크기가 2 배정도 커진 경우도 관찰되었다.

본 실험의 결과에 의하면 상아질의 우식과 재광화 과정은 단순한 탈회와 재광화의 독립적인 과정이 아니고 동력학적으로 탈회와 재광화가 동시에 일어나는 과정이며, 이때 재광화는 기존의 수산화인회석 결정의 표면으로부터 진행되었다.

주요어: 재광화, 상아질, pH, 탈회, 법랑질, 주사전자현미경